

На правах рукописи

ЖУРАВЛЕВ Андрей Александрович

**МАКРОТУРБУЛЕНТНАЯ СТРУКТУРА ПРИМЕСЕЙ
В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА
РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН**

Специальность 25.00.29 – *физика
атмосферы и гидросферы*

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Казань – 2002

Работа выполнена на кафедре радиоастрономии
Казанского государственного университета

- Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук,
профессор Тептин Г.М.
- Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук,
профессор Москаленко Н.И.,
кандидат физ.-мат. наук,
старший научный сотрудник
Танташев М.В.
- Ведущая организация: Институт физики атмосферы РАН
им. А.М. Обухова, г. Москва.

Защита состоится 26 декабря 2002 года в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.081.18 в Казанском государственном университете им. В.И. Ульянова-Ленина по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, физический факультет, ауд. 210.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. Лобачевского Казанского государственного университета.

Автореферат разослан 25 ноября 2002 г.

Ученый секретарь диссертационного
Совета, доктор физ.-мат. наук



А.В. Карпов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена эмпирическим исследованиям макромасштабной турбулентности в приземном слое атмосферы, поиску пространственных и временных закономерностей распределения пассивной, консервативной примеси, исследованию сезонных и суточных вариаций концентраций примесей, оценкам влияния метеорологических условий на структуру макротурбулентности. В диссертации построена эмпирическая модель макротурбулентных флуктуаций концентраций пассивных примесей в приземном слое для масштабов 1-6 км. На основе полученной модели и с учетом связи коэффициента преломления с концентрацией химической примеси, определены структурные и спектральные функции флуктуаций индекса рефракции радиоволн в приземном слое. Показаны способы приложения полученных эмпирических закономерностей пространственного распределения примеси к решению задач распространения радиоволн дм и см диапазонов и дистанционного мониторинга.

Актуальность проблемы. Турбулентные движения представляют собой флуктуации параметров среды и характеризуются своими пространственными масштабами. В настоящее время существуют достаточно устоявшиеся представления об атмосферной мелкомасштабной турбулентности. Определены общие принципы образования и эволюции неоднородностей вязкого и инерционного интервалов. В значительной степени разработаны методы ее описания вплоть до внешнего масштаба.

Но интервал крупномасштабной турбулентности, с размерами превышающими внешний масштаб, до сих пор недостаточно исследован. Слабая применимость методов, используемых для исследования мелкомасштабных неоднородностей, отсутствие продолжительных циклов наблюдений атмосферных характеристик в этом интервале масштабов стало причиной слабой исследованности неоднородностей в макротурбулентной области с масштабами от единиц до десятков километров.

Известно, что в атмосфере непрерывно образуются и разрушаются неоднородности различных ее параметров, среди которых концентрация примесных веществ, присутствующих в воздухе. Под действием турбулентных процессов перемешивания и переноса, конвективных и волновых процессов

примесь рассеивается, переносится в горизонтальном и вертикальном направлениях, образуются неоднородности ее концентрации. Это порождает значительные пространственные флуктуации концентраций газовых примесей, тем большие, чем выше средний уровень загрязнения.

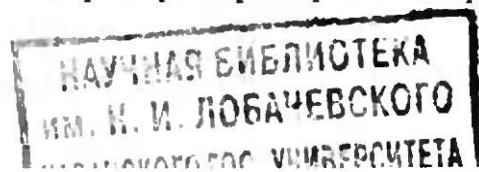
Вместе с тем, для решения задач дистанционного мониторинга, расчета параметров радиотрасс необходимо с высокой точностью знать как абсолютную величину коэффициента преломления, так и его пространственную и временную изменчивости.

Известно, что помимо атмосферного давления, температуры и влажности на диэлектрические свойства воздуха будут оказывать влияние полярные химические примеси. Этот эффект связан с изменением пространственной ориентации полярных молекул под действием электромагнитного поля и проявляется он в частотном диапазоне 10 МГц–50 ГГц [1*, 2*]. В работе предлагается дополнить классическое выражение для расчета коэффициента преломления слагаемыми, учитывающими влияние полярных газовых примесей.

Особую важность приобретают эти исследования при рассмотрении процессов рассеяния радиоволн на атмосферных неоднородностях в городе. В связи с особенностями структуры городской турбулентности и величины загрязнения воздуха, коэффициент преломления приземного слоя атмосферы в городских условиях может изменяться в значительно больших пределах, чем на открытой местности.

Целью диссертационной работы является:

Эмпирическое исследование структуры крупномасштабных турбулентных неоднородностей концентрации примеси в приземном слое с масштабами 1-6 км в городских условиях. Исследование временной изменчивости макротурбулентной структуры, влияния сезонного и суточного факторов, ее зависимость от метеопараметров. Исследование влияния сезонного и суточного факторов, величин метеопараметров на уровень загрязнения городского воздуха. Оценка влияния воздушных химических примесей на коэффициент преломления атмосферного воздуха. Применение полученных эмпирических закономерностей пространственных и временных флуктуаций концентрации примеси для расчета некоторых параметров распространения радиоволн в атмосфере с загрязнениями.



Решаемые задачи. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

Разработать методику обработки данных измерений, обеспечивающую исключение влияния местных факторов, переноса примеси средним ветром, топографию поверхности.

Теоретически обосновать зависимость коэффициента преломления воздуха от концентрации химической примеси и провести модельные расчеты некоторых параметров распространения радиоволн в приземном слое.

Методы исследования. Решение поставленных задач базируется на данных длительного эксперимента, использовании методов аппарата случайных функций, корреляционного и структурного анализа, методах математического моделирования с использованием современной технологии вычислительного эксперимента, статистических методах. Основные результаты получены на статистически надежном длительном ряде натурных измерений и проверены путем сравнения с данными полученными другими авторами.

Научная новизна работы:

Впервые проведено статистически обеспеченное эмпирическое исследование макротурбулентной структуры приземного слоя в масштабе 1-6 км. На основе корреляционных и структурных функций определены основные закономерности и получена качественная картина макротурбулентных процессов в приземном слое.

Получены общие закономерности поведения корреляционных и структурных функций пространственных флуктуаций концентраций примесей и индекса рефракции, представлена их аналитическая аппроксимация. Изучена изменчивость макротурбулентной структуры в приземном слое атмосферы в зависимости от погодных условий, сезона, времени суток.

Представлены некоторые закономерности изменчивости концентраций различных примесей в городском воздухе. Подробно исследованы суточные и сезонные вариации их концентрации, влияние метеорологических условий. Полученные результаты использованы для модельных расчетов пространственной изменчивости концентрации примесей.

Предложен способ учета и получены оценки влияния химических примесей на коэффициент преломления среды. Изучена зависимость диэлектричес-

кой проницаемости атмосферы от погодных условий, сезона, времени суток с учетом загрязнений. Проведены модельные расчеты изменчивости оптической толщины по трассе с учетом крупномасштабной неоднородной структуры приземного слоя.

На защиту выносятся:

- * Закономерности поведения эмпирических корреляционных и структурных функций пространственных флуктуаций концентрации примеси в приземном слое в условиях города.

- * Закономерности сезонной и суточной изменчивости макротурбулентной структуры, оценки влияния метеорологических факторов на макротурбулентную структуру приземного слоя.

- * Сезонные и суточные вариации концентраций атмосферных примесей в городских условиях, оценки влияния некоторых метеопараметров на их концентрации.

- * Метод учета и оценочные расчеты влияния воздушных химических примесей на радиофизические свойства воздуха. Закономерности пространственной и временной изменчивости индекса рефракции в условиях города с учетом загрязнения воздуха. Эмпирические зависимости коэффициента преломления атмосферы от погодных условий, сезона, времени суток с учетом атмосферных загрязнений. Результаты модельных расчетов некоторых параметров распространения радиоволн, учитывающие влияние турбулентных неоднородностей метеопараметров и концентраций химических примесей.

Практическая ценность работы

Полученные пространственные корреляционные и структурные функции концентраций примесей позволяют описать структуру макротурбулентности в приземном слое. Обнаруженные статистические закономерности поведения структурных функций параметров атмосферы в области крупномасштабной турбулентности позволяют учесть ее влияние в динамических моделях атмосферы и различных прикладных задачах. Эти результаты можно использовать для дополнительного учета влияния неоднородностей концентраций химических примесей на распространение радиоволн. Предлагаемый метод учета влияния химических примесей на индекс рефракции в атмосфере позволяет повысить точность определения радиофизических

свойств среды. Полученные результаты имеют дополнительную практическую ценность, поскольку обладают высокой статистической достоверностью, ввиду использования экспериментальных данных продолжительного, непрерывного мониторинга состояния атмосферного воздуха.

Личный вклад автора. Исследования поставленных вопросов аналитическими и численными методами были выполнены лично автором. Им разработана специальная методика обработки данных, проведены расчеты, проанализированы полученные результаты и сделаны основные выводы.

Апробация результатов. Результаты работы докладывались лично автором на: XIX Всероссийской научной конференции по распространению радиоволн, Казань-1999; VII рабочей группе «Аэрозоли Сибири», Томск-2000; Conference on Visibility, Aerosol, and Atmospheric Optics, Vienna-2000, Austria; European Aerosol Conference, Leipzig-2001, Germany; VIII рабочей группе «Аэрозоли Сибири», Томск-2001; IX Международном симпозиуме «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Томск-2002. А так же на: Международной аэрозольной конференции, Москва-2000; XX Всероссийской научной конференции по распространению радиоволн, Нижний Новгород-2002.

Дважды работа по этому направлению была удостоена именной стипендии мэра г. Казань среди студенческих и аспирантских работ в 1999 и 2001 гг. Работа удостоена диплома 3-й степени конкурса им. Лобачевского среди студенческих и аспирантских работ ВУЗов республики Татарстан в 2002 г. Автор является научным руководителем проектов поддержанных фондом РФФИ №01-05-74727, №02-05-06222. Принимал участие в качестве исполнителя в исследованиях поддержанных грантами: РФФИ №01-05-64390, НИОКР РТ №09-9.4-52/2001 ф.

Публикации. Автором опубликовано по теме диссертации 19 работ. Из них 6 статей в научных журналах, 6 статей в сборниках трудов научных конференций, 7 опубликованных тезисов докладов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Содержит 152 страницы текста без приложения, в т.ч. 68 рисунков, 12 таблиц. Библиография - 110 названий.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость результатов работы, изложена структура работы.

В первой главе представлен обзор литературы посвященной исследованиям атмосферной турбулентности, методам определения коэффициента преломления воздуха, вопросам распространения радиоволн в неоднородной среде. Изложены основные положения методов описания случайных функций и случайных полей, применяемых при анализе турбулентности. Приведена классификация неоднородностей в зависимости от их масштабов. Представлены структурные и спектральные функции турбулентных флуктуаций концентраций пассивной, консервативной примеси от вязкого интервала вплоть до внешнего масштаба неоднородностей.

Анализ научной литературы показал, что значительный вклад в исследование неоднородной структуры атмосферы и характеристик атмосферной турбулентности внесли А.Н. Колмогоров, А.М. Обухова, А.С. Монин, А.М. Яглом, а его приложение для расчета параметров распространения электромагнитных волн дали В.И. Татарский, А. Исимару, Е.Л. Фейнберг, Г.М. Теплин. Вместе с тем, как показал обзор литературы, недостаточно исследованным является интервал крупномасштабных неоднородностей порядка единиц и десятков километров. Это и позволило определить основные цели и задачи диссертационного исследования.

В обзоре так же освещены вопросы определения значений индекса рефракции по метеорологическим данным, рассмотрены вопросы влияния неоднородностей среды на распространение радиоволн. Изложены методы расчета сечения рассеяния, оптической толщины, интенсивности радиосигнала, с учетом влияния неоднородной структуры тропосферы.

Во второй главе на основе данных мониторинга состояния атмосферы проведено эмпирическое исследование неоднородной структуры приземного слоя в диапазоне масштабов 1-6 км. Многолетний цикл измерений позволил получить высокую статистическую надежность результатов.

Исследование макротурбулентной структуры в приземном слое проведено методами корреляционного и структурного анализа флуктуаций измеряемых параметров среды: температуры, влажности, давления, скорости ветра, концентраций NO , NO_2 , SO_2 , CO , аэрозоля. Корреляционный анализ позволил получить карти-

ну макротурбулентных процессов в приземном слое. Впервые для диапазона масштабов 1-6 км получены эмпирические структурные функции и количественные оценки пространственной изменчивости атмосферных параметров.

В одном из городов [53°с.ш; 51°в.д.] установлено пять станций непрерывного мониторинга состояния атмосферного воздуха. Станции производят, ежеминутные измерения концентраций различных химических примесей и базовых метеорологических параметров. Станции расположены в различных районах города в пределах городской черты и пространственно разнесены на расстояния от 0,9 до 6,3 км друг от друга, образуя достаточно равномерную сетку интервалов в указанном диапазоне. Исследуемая база содержит данные трехлетнего периода наблюдений с октября 1996 г. по декабрь 1999 г.

Измерительные станции представляет собой полностью автоматизированную систему. Химические примеси NO и NO₂ измеряются методом химической люминесценции с точностью не хуже 3 ppb, SO₂ – методом ультрафиолетовой флюоресценции с точностью метода 1 ppb. Аэрозоль измеряется методом осаждения частиц на пластине, с последующим автоматическим анализом путем облучения бета излучением и измерением величины поглощения. Метод обеспечивает точность, не хуже 1 ppb.

Измерения метеопараметров и забор воздуха для анализа проводились на высоте 2,4 м с временным интервалом 1 минута для газовых примесей и метеопараметров, и с получасовым интервалом для удельной массовой концентрации аэрозоля. Затем измерения всех параметров усреднялись за получасовой интервал. Статистическая надежность расчетов оценивалась по критерию Стьюдента с вероятностью 0,95.

Разработана методика селекции исходных данных по направлению ветра, позволяющая исключить влияние орографии поверхности. Строились корреляционные функции концентраций примесей, наблюдавшихся при продольном или поперечном преимущественном направлении ветра, с допустимым отклонением $\pm 15^\circ$. Поскольку доверительные интервалы корреляционных кривых для продольного и поперечного направлений ветра, перекрываются, сделан вывод, что корреляционные функции слабо зависят от выбора преимущественного направления ветра и допустимо их усреднение по взаимно противоположным направлениям ветра. Усреднение незначительно увеличивает погрешность вычислений, но позволяет исключить влияние орографии поверхности и повысить статистическую надежность расчетов.

Построены пространственные корреляционные функции концентраций примесей и основных метеопараметров. Анализ полученных графиков позволил сформировать три группы параметров, образующих под действием атмосферных движений сходное пространственное распределение.

Первую группу составили: температура воздуха, относительная влажность, атмосферное давление. Они обладают равномерными высокими значениями корреляции 0,95-0,99 в пределах всего рассматриваемого диапазона масштабов 1-6 км и не имеют значимых пространственных флуктуаций (рис.1).

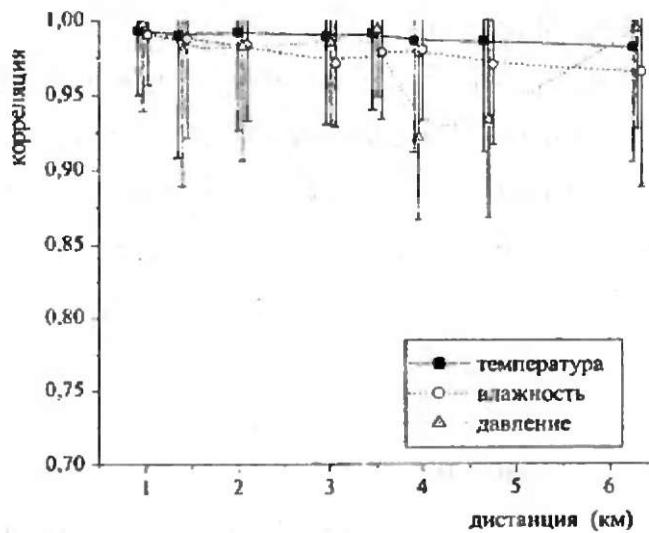


Рис.1. Пространственные корреляционные функции температуры, относительной влажности, давления

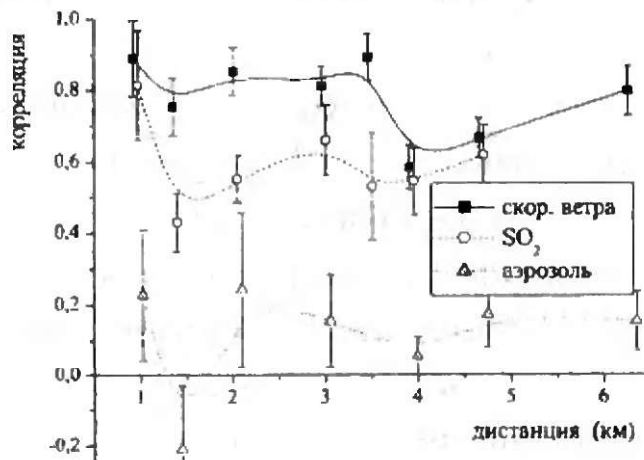


Рис.2. Пространственные корреляционные функции SO₂, аэрозоля и скорости ветра

Вторая группа параметров (рис.2) имеет достаточно ярко выраженные пространственные флуктуации корреляционных функций, имеющие два минимума в районе расстояний 1,5 км и 3,5-5 км. К этой группе отнесены примеси: SO_2 , аэрозоль, а так же скорость ветра. Корреляционные функции указанных параметров в пределах среднеквадратичной ошибки подчиняются схожей закономерности.

К третьей группе отнесены химические атмосферные примеси: NO , NO_2 и CO , имеющие значимый минимум корреляции в диапазоне 2-4 км. Так для NO и NO_2 минимумы обнаруживаются при расстоянии 3-3,5 км, для CO в диапазоне масштабов 2-3 км (рис.3).

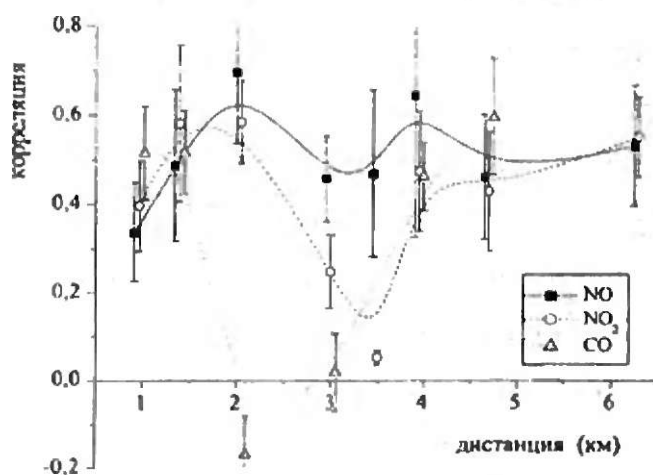


Рис.3. Пространственные корреляционные функции NO , NO_2 и CO

Таким образом, у большинства атмосферных примесей обнаруживаются минимумы корреляции в области масштабов 1,5 км и 3,5-5 км. В области тех же масштабов наблюдается минимум пространственной корреляционной функции скорости ветра. В работе [3*] по результатам лидарного зондирования в пограничном слое обнаруживаются неоднородности с горизонтальными масштабами порядка 4 км, а самолетные нефелометрические измерения показывают так же наличие горизонтальных неоднородностей аэрозоля с размерами 3 км и 1,3 км.

Вместе с тем пространственные корреляционные функции температуры, влажности и давления не имеют пространственных вариаций и обладают устойчивым высоким уровнем корреляции. Это позволяет утверждать, что макротурбулентные флуктуации скорости ветра являются одной из причин образования неоднородностей концентрации примеси в приземном слое.

Рассмотрена сезонная зависимость макротурбулентной структуры. Данные были разделены на два периода: теплый (май-сентябрь) и холодный (ноябрь-март). Сделан вывод об отсутствии значимого влияния сезонного фактора на пространственное распределение концентрации примеси в приземном слое. Качественный вид исследуемых корреляционных функций не выявил сезонной зависимости. В целом корреляционные коэффициенты для летнего и зимнего периодов в пределах доверительных интервалов совпадают.

Можно лишь отметить, что такие примеси как NO , NO_2 и аэрозоль имеют в холодный период большую величину корреляции на всем диапазоне масштабов. Кроме того, зимой наблюдается повышение уровня корреляции в районе масштабов 3-3,5 км, что говорит либо о смещении спектра неоднородностей в сторону меньших масштабов 2,5-3 км, либо о сглаживании спектральной кривой в районе расстояний 3-3,5 км.

Исследована изменчивость структуры турбулентности для различного времени суток. Было выделено дневное время - с 9^{00} до 18^{00} и ночное - с 22^{00} до 5^{00} . Исследование суточной изменчивости проводилось для теплого периода в связи с большим количеством измерений, что повысило достоверность выводов.

Проведенное исследование показало, что почти все измеряемые параметры обладают зависимостью пространственной структуры от времени суток. В дневное время корреляционные функции температуры, влажности и скорости ветра плавно убывают, тогда как в ночное время появляются два минимума в интервалах 1,5-2,5 км и 3-4 км. Концентрация аэрозоля демонстрирует прямо противоположную зависимость. Отсутствие какой либо суточной зависимости показали NO и CO . Примеси NO_2 и SO_2 показали различия на некоторых участках пространственной корреляционной функции. Существенные различия величины корреляции в диапазоне 4-5 км демонстрирует концентрация SO_2 .

Исследование показало, что макротурбулентный режим приземного слоя имеет различия в своей структуре для дневного и ночного времени. В ночное время ярко проявляются минимумы корреляции в интервалах масштабов неоднородностей 1,5-2,5 км и 3-4 км. Разные уровни корреляции, вероятно, обусловлены суточной изменчивостью интенсивности турбулентного обмена — высокая днем и значительное ее понижение ночью. Этот вывод хорошо согласуется с общими представлениями о турбулентности и влиянием изменчивости скорости ветра в приземном слое в течении суток.

Значительный интерес представляют результаты исследования пространственного распределения примеси при разных метеорологических условиях. Анализ так же проводился для теплого периода.

Влияние температурного режима выявило некоторые значимые различия в структуре турбулентного потока и его интенсивности. Существенные различия уровня корреляции наблюдаются в диапазоне пространственных масштабов 2-5 км для NO и в диапазоне 3-4 км для NO₂. Подобные различия демонстрируют и корреляционные функции концентраций CO и аэрозоля, но в районе масштабов 1,5 км. Корреляционные функции концентраций примесей для различных уровней скорости ветра и относительной влажности, в пределах доверительных интервалов совпадают для всех веществ. Некоторые различия уровня корреляции наблюдаются лишь для NO, SO₂ и аэрозоля.

Проведенное исследование, показало, что макротурбулентная структура приземного слоя, зависит от метеорологической ситуации. При низких значениях температуры воздуха, уровень корреляции выше, чем при температурах превышающих среднесезонное значение. Пространственное распределение концентрации примеси так же претерпевает изменения, заключающиеся в изменении спектрального состава крупномасштабной турбулентности – смещение минимума корреляции от значений порядка 1,5 км и 5 км при холодной погоде к масштабам 3-4 км при теплой.

Помимо корреляционного анализа, для периодов времени, когда не выполнялось условие стационарности, анализ пространственной структуры макротурбулентности производился при помощи структурных функций, рассчитанных по общему выражению:

$$B_q(r) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (q_i(0) - \bar{q}_i(0))(q_i(r) - \bar{q}_i(r))$$

где: $q(0)$ и $q(r)$ – концентрации примесей в двух пунктах, на расстоянии r .

Для относительной влажности воздуха, был произведен пересчет в массовую долю водяного пара, по известному полуэмпирическому выражению:

$$e = 6,1078 \cdot \frac{H}{100} \cdot e^{\frac{17,269(T-273,16)}{T-35,86}}$$

где: e – давление водяного пара в мб., H – относительная влажность в %, T – температура в К.

Построены структурные функции пространственной изменчивости температуры воздуха и концентрации водяного пара. Исследования проведены для продольного и поперечного преимущественных направлений ветра относительно базовой линии, а так же независимо от его направления.

Пространственные структурные функции концентраций химических примесей и индекса рефракции показали увеличение амплитуды флуктуаций с ростом дистанции. Для параметров в меньшей степени зависящих от антропогенных факторов (водяной пар, аэрозоль) наблюдается более плавный и устойчивый рост структурной функции с увеличением расстояния.

Дальнейшее исследование мезомасштабной структуры приземного слоя состояло в аппроксимации структурных функций аналитическим выражением. В обзоре показано, что в исследуемом диапазоне рост структурной функции концентрации пассивной, консервативной примеси, должен подчиняться степенному закону. Поскольку мы исследуем область масштабов лежащую между архимедовым интервалом и областью крупномасштабных неоднородностей, то показатель степени должен лежать в интервале (0-0,4). С помощью пакета Microcal Origin 6.0, была построена аппроксимирующая кривая на всем исследуемом диапазоне в предположении существования пространственной степенной зависимости вида: $D_r = ar^b$. В качестве примера на рис.4 представлена структурная функция температуры воздуха и ее аппроксимация.

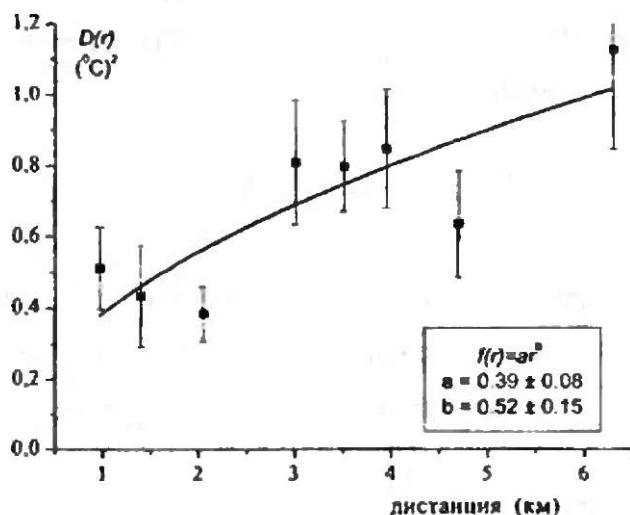


Рис.4. Пространственная структурная функция температуры и ее степенная аппроксимация

Как видно из иллюстрации показатель степени аппроксимирующей функции составляет значение порядка 0,35, что соответствует переходному интервалу масштабов из архимедовой подобласти к крупномасштабной турбулентности. Структурная функция концентрации водяного пара имеет подобный вид. Она нарастает в интервале 1-3 км, а далее, флуктуируя, остается на некотором уровне.

Предположено, что по мере увеличения масштабов неоднородности показатель степени должен понижаться. Для проверки этого предположения строились две аппроксимирующие кривые, по точкам диапазона расстояний 1-3 км и диапазона 3-6 км. На рис.5 представлена структурная функция флуктуаций концентрации аэрозоля, а так же аппроксимирующие кривые.

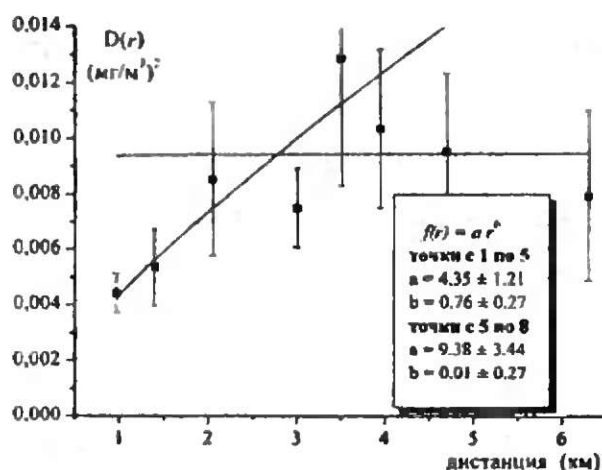


Рис.5. Структурная функция концентрации аэрозоля для поперечного направления и кусочная аппроксимация

Аналитическая аппроксимация структурных функций пространственной изменчивости концентрации примеси показала, что в среднем, по исследуемому диапазону масштабов 1-6 км показатель степени принимает значения (0,30-0,45). Показано согласие поведения показателя степени с теоретической гипотезой. Наиболее достоверно описанное поведение демонстрируют структурные функции температуры, концентраций водяного пара и аэрозоля.

В третьей главе рассмотрены вопросы временной изменчивости величины загрязнения воздуха, зависимость концентраций примесей от времени суток и метеорологической ситуации, рассчитаны статистические характеристики среднегодового уровня загрязнения воздуха, определены горизонтальные градиенты концентраций атмосферных примесей в приземном

слое. Для каждой измеряемой примеси вычислены: среднее значение концентрации за весь период наблюдений, наиболее вероятная концентрация и уровень максимальных значений.

Исследование максимальных значений концентраций, показало, что в городской атмосфере возникают продолжительные ситуации со значительным повышением уровня загрязнения воздуха, превышающие уровень ПДК. Выявлено, что хотя средний уровень загрязнения достаточно низок, в некоторые периоды времени величина загрязнения превышает средний уровень в десятки-сотни раз. Кроме того, при некоторых метеорологических ситуациях высокий уровень загрязнения сохраняется на протяжении суток и даже недель. Исследование показало, что значительное влияние на уровень загрязнения оказывают сезонный и суточный ходы.

Анализ среднесезонного уровня загрязнения показал, что зимние концентрации таких химических веществ, как NO , NO_2 , CO больше летних в среднем в 1,5 - 2 раза. В то же время концентрация аэрозоля значительно больше в летний период, чем зимой, что, на наш взгляд, можно объяснить добавлением значительного количества биоаэрозоля в летний период. Сезонный ход особенно хорошо просматривается у таких примесей как: NO , CO и аэрозоля. В основе сезонной изменчивости, по нашему мнению, лежат различия режима циркуляции воздуха в приземном слое, изменчивость конвекционного режима, преимущественного направления ветра, метеорологических параметров. Некоторое влияние накладывает изменчивость источников, их мощности.

Следующим шагом стало исследование суточного хода концентраций измеряемых примесей. Как и ранее, статистическая надежность расчетов оценивалась по критерию Стьюдента с вероятностью 0,95.

Графики суточных вариаций концентраций таких примесей как NO , NO_2 , CO и аэрозоля имеют подобный друг другу вид. В летний период наивысшие концентрации примесей наблюдаются с 7 до 10 утра (утренний максимум) и небольшое повышение концентрации в 21-22 часа (вечерний максимум). В ночное время, как и ожидалось, кривая суточного хода имеет глубокий минимум с 23 часов ночи до 5 часов утра (ночной минимум). Помимо того еще один минимум наблюдается с 12 до 17 часов дня (дневной минимум) (рис.6). Дневной минимум значителен по амплитуде и хорошо просматривается для этих примесей, часто принимая значения меньше среднесуточных.

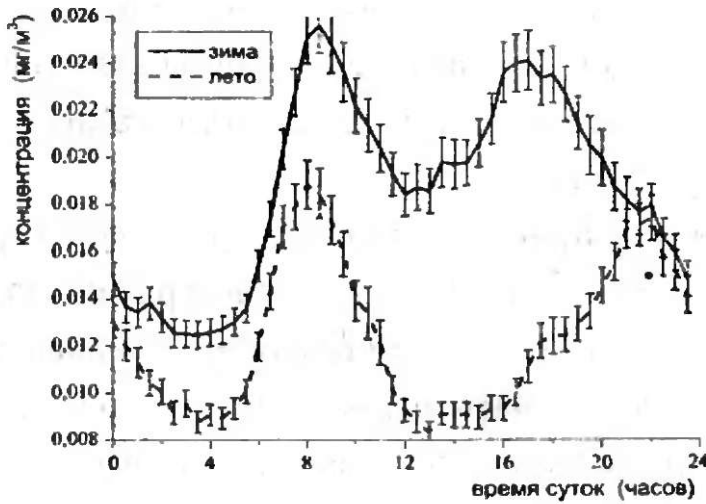


Рис.6. Среднесезонный суточный ход концентрации NO_2

Поведение суточных вариаций концентраций примесей, в целом хорошо согласуется с общепринятыми представлениями об атмосферных процессах. Правда при поверхностном рассмотрении довольно трудно объяснить происхождение дневного минимума, поскольку интенсивность поступления веществ в атмосферу в этот период почти не сокращается.

Поиск причины такого поведения кривых суточного хода был продолжен рассмотрением суточной изменчивости метеопараметров. Обнаружено, что наиболее существенный фактор, влияющий на величину концентраций примесных веществ в атмосфере - это суточная изменчивость скорости ветра.

Кривая суточного хода скорости ветра имеет вид представленный на рис.7. На той же координатной сетке построен график суточной изменчивости концентрации NO .

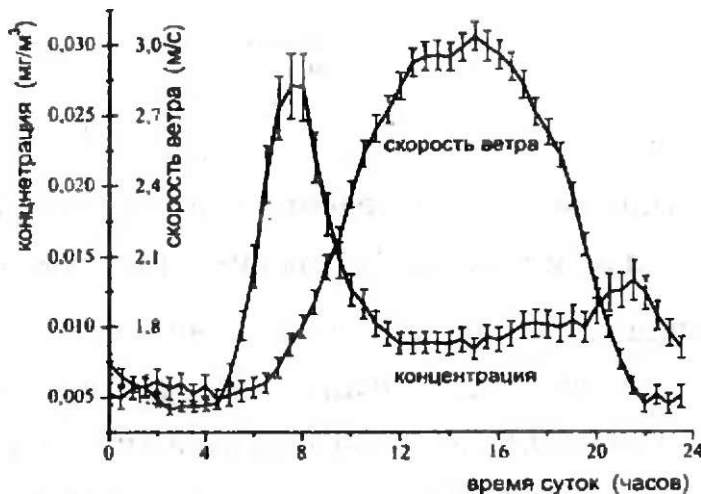


Рис.7. Суточный ход концентрации NO и скорости ветра летом

Ночью, с 22 до 6 утра обычно скорость ветра минимальна и составляет величины порядка 1,5 м/с, а днем с 13 до 17 часов принимает наибольшие значения - до 3 м/с. Утреннее нарастание скорости ветра начинается в 7 часов и продолжается до 12 часов дня.

Графики суточных вариаций концентраций примесей для разных скоростей ветра показали, что при сильном ветре концентрации незначительно меняются около среднего значения и обнаруженные ранее максимумы не проявляются. Видимо уровень загрязнения городского воздуха во многом определяется скоростью ветра, хотя существуют и другие причины дневного убывания концентрации.

Проведен анализ влияния метеорологических параметров на концентрации примесей путем построения вероятностных распределений концентраций примесей с учетом значений метеопараметров.

Относительная влажность воздуха не оказывает существенного влияния на концентрации таких веществ как NO и CO. Некоторое влияние этот параметр оказывает на уровень загрязнения такими примесями как NO₂ и SO₂ (рис.8).

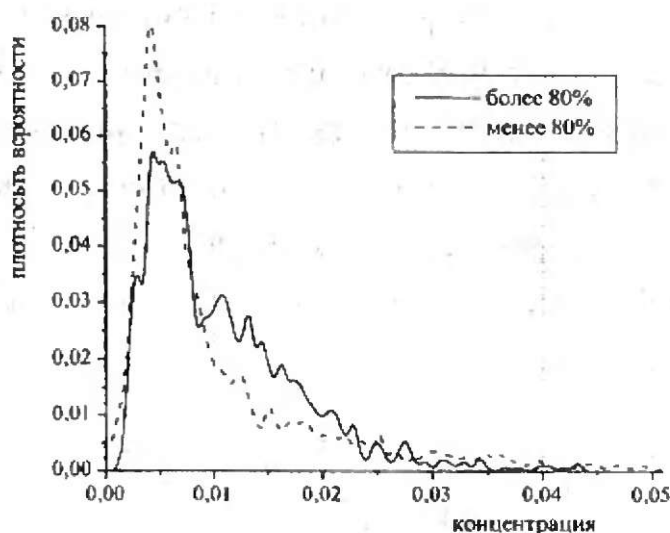


Рис.8. Вероятностные распределения концентрации NO₂ для относительной влажности больше и меньше 80%

Из иллюстрации видно, что при повышенной влажности в приземном слое чаще наблюдаются большие концентрации NO₂, чем при низких значениях влажности. Исследование показало, что относительная влажность оказывает заметное влияние и на концентрацию аэрозоля. В отличие от NO₂ и SO₂ при повышенной влажности, концентрация аэрозоля принимает меньшие значе-

ния. Такое поведение аэрозоля, вероятно, обусловлено его обводнением при высокой влажности, что увеличивает скорость оседания частиц, уменьшая удельную концентрацию.

В работе так же исследовано влияние скорости ветра. Значимого влияния на удельные концентрации NO и SO_2 не обнаружено. Слабые различия показали такие примеси как CO и аэрозоль. Существенные различия имеет концентрация NO_2 представленная на рис. 9.

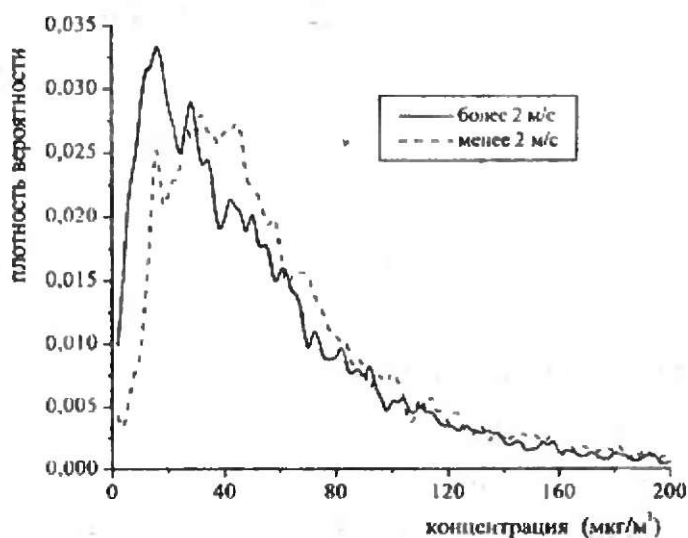


Рис.9. Вероятностные распределения массовой концентрации аэрозоля для скорости ветра больше и меньше 2 м/с

Пространственные градиенты концентраций примесей в приземном слое исследовались путем построения кривых вероятностного распределения. Часть графиков имеет максимум в районе нулевых градиентов концентраций, далее вероятностная кривая быстро спадает. Вместе с тем встречаются графики, достигающие максимума на некотором участке кривой, достаточно удаленным от нулевых значений. Таким образом получены достоверные данные по вероятности возникновения того или иного градиента примеси в приземном слое. Эти данные можно использовать в физических моделях атмосферы, экологических и радиофизических моделях, где необходимо знать пространственные градиенты концентрации примесных веществ в воздухе.

В четвертой главе представлена методика расчета коэффициента преломления загрязненного воздуха, изложены результаты расчетов временной и пространственной изменчивости индекса рефракции, произведены модельные расчеты изменчивости оптической толщины по трассе.

Поскольку результирующий коэффициент преломления зависит от концентрации полярных газов, то классическое выражение, используемое в радиометеорологии, можно обобщить на случай содержания полярных примесных газов, путем учета вклада каждого газа тропосферы в виде суммы:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 = K_0 \frac{P_d}{T} + \sum_i A_i \frac{P_i}{T} + \sum_i B_i \frac{P_i}{T^2}$$

где: T – температура воздуха, P_d – давление неполярных газов, i – номер воздушной примеси, включая водяной пар, P_i – парциальное давление соответствующего примесного газа, A_i и B_i – постоянные коэффициенты, зависящие

от его свойств: $A_i \sim \frac{\alpha_0}{M}$, $B_i \sim \mu^2$.

Представленное выражение позволяет рассчитывать индекс рефракции смеси газов при известных концентрациях примесей, температуре, давлении. На его основе данные наблюдений были пересчитаны в индекс рефракции.

Получены среднегодовые оценочные значения вклада в индекс рефракции каждой из исследуемых примесей. В своей основе, на 82%, коэффициент преломления воздуха определяется поляризационной составляющей. Примерно на порядок меньшее влияние – 17%, оказывает водяной пар. Все примесные газы, при обычных атмосферных концентрациях оказывают влияние менее 0,01%.

Вклад оксида азота в общий индекс рефракции имеет слабый сезонный ход, а NO_2 и SO_2 не показали сезонной зависимости. Хорошо просматривается сезонный ход для оксида углерода и водяного пара. Итоговый индекс рефракции, в приземном слое имеет годовой ход с минимумом в летние месяцы и максимумом в зимние. Анализ результирующего индекса рефракции показал, что в зимние месяцы изменчивость индекса рефракции в основном обусловлена изменчивостью температуры, а в летний период несмалое влияние оказывают суточные вариации влажности.

Ряд примесей показал наличие значительных сезонных и суточных вариаций, но ввиду малости их обычных концентраций в атмосфере они не влияют на форму результирующей кривой индекса рефракции. В своей основе поведение графика суточных вариаций коэффициента преломления определяется изменчивостью температуры и влажности (рис. 10).

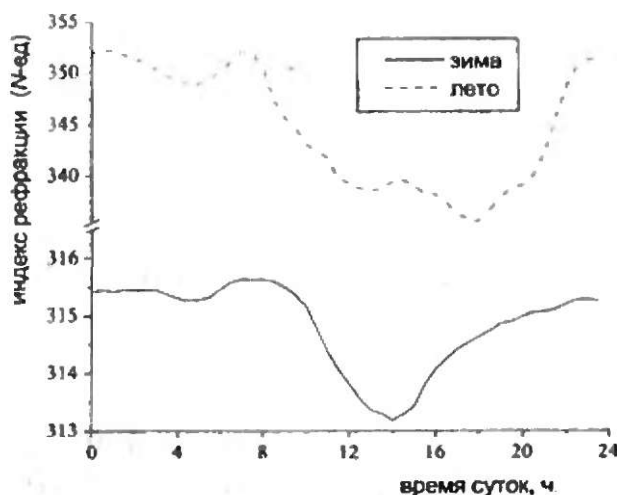


Рис. 10. Среднемесячные суточные вариации результирующего индекса рефракции для летнего (июль) и зимнего (декабрь) месяцев

Структурные функции индекса рефракции в целом совпадают со структурными функциями концентраций соответствующих примесей и метеопараметров. Аппроксимация структурных функций индекса рефракции аналитическим выражением показала подобную концентрациям степенную зависимость. К примеру, структурная функция составляющей индекса рефракции обусловленной влиянием водяного пара в диапазоне 1-6 км подчиняется зависимости вида: $D(r) = 6 \cdot r^{1/3}$, где: r - масштаб неоднородности в километрах.

Результаты исследований крупномасштабных неоднородностей имеют практическое применения в задачах распространения радиоволн. К примеру, результаты проведенных исследований позволяют оценить интенсивность рассеяния радиоволн на неоднородностях, оптическую толщину воздуха с учетом макротурбулентности.

В качестве иллюстрации возможного учета макротурбулентной структуры, рассчитана изменчивость оптической толщины участков радиотрассы в приземном слое. В обзоре было показано, что она определяется коэффициентом ослабления, который в свою очередь рассчитывается на основе спектральной функции коэффициента преломления Φ_q :

$$k_{ext} = \frac{1}{2} \left(\pi K^2 \cdot \frac{0,745 p}{T^2} \frac{m_b}{m_n} \right)^2 \int_0^\pi \cos \theta \Phi_q(\theta, \lambda) d\theta$$

где: $K = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновой вектор, m_b и m_n – молекулярные массы примеси и воздуха соответственно.

Из условия Брэгга для дифракции на пространственных структурах следует условие о том, что значимое рассеяние радиоволны будет происходить на неоднородностях, размер которых определяется длиной волны радиосигнала и углом рассеяния: $r(\theta) = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\theta}{2}}$.

График, представленный на рис.11, иллюстрируют пространственную изменчивость оптической толщины, обусловленную рассеянием на неоднородностях концентрации водяного пара. Нижний график построен в приближении постоянства пространственного градиента концентрации водяного пара, а верхний учитывает макротурбулентную пространственную изменчивость концентрации, используя эмпирические структурные функции. Длина волны – 10 см.

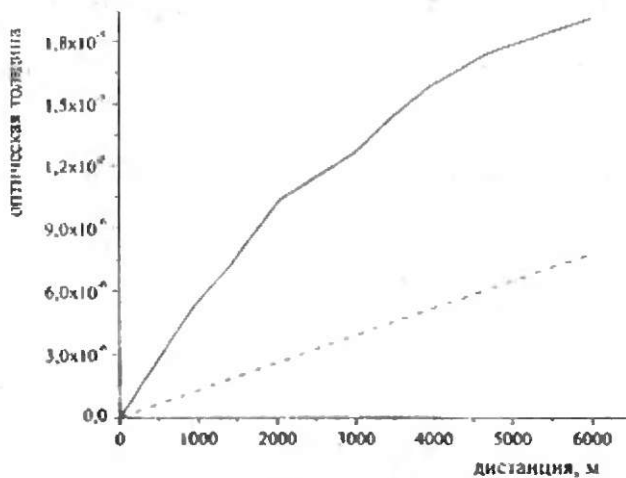


Рис.11. Пространственная изменчивость оптической толщины по трассе

Представлена частотная зависимость оптической толщины волн показавшая уменьшение влияния неоднородностей примесей с ростом длины волны. Рассчитано изменение интенсивности излучения прошедшего через слой неоднородной атмосферы с рассчитаной оптической толщиной. Вклад всех химических примесей, в интенсивность рассеянного сигнала, составляет значения порядка 10^{-8} дБ, водяного пара – $2 \cdot 10^{-4}$ дБ. На основе экспериментальных данных в [4*], приводится значение 0,3 дБ на частоте 36 ГГц, при протяженности радиотрассы 4,1 км. Эксперимент учитывает все факторы влияющие на интенсивность, то можно утверждать о согласии расчетов и эксперимента.

В заключении приведены основные результаты работы.

В приложении приведены дополнительные иллюстрации корреляционных и структурных функций, графики модельных расчетов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Корреляционный анализ концентраций примесей и значений метеопараметров в приземном слое атмосферы позволил исследовать пространственную структуру макротурбулентности. Выявлены значимые минимумы пространственной корреляции в интервале масштабов 1,5-2 км и 3,5-5 км для воздушных примесей и скорости ветра. Поскольку в структуре пространственного распределения температуры, влажности и давления изменчивость в диапазоне 1-6 км не обнаружена, то, вероятно, эти параметры не являются причиной образования макротурбулентных неоднородностей концентрации примеси в приземном слое. Поскольку ряд примесей имеет структуру схожую со структурой скорости ветра, то одной из причин образования крупномасштабных неоднородностей концентрации примеси является неоднородная структура поля ветра.

2. Исследование временной изменчивости пространственных корреляционных функций показало отсутствие значимой сезонной зависимости. Вместе с тем в макротурбулентной структуре скорости ветра и концентраций химических примесей выявлена суточная зависимость. Особенно ярко влияние времени суток проявилось для структуры скорости ветра. Оно заключается в появлении минимумов корреляции в районе дистанций 2 км и 4-5 км в ночное время и их отсутствии днем.

3. При исследовании влияния метеопараметров обнаружена зависимость макротурбулентной структуры от температуры воздуха в приземном слое для летнего периода. При низких значениях температуры воздуха, уровень корреляции значительно выше, чем при температурах превышающих пороговое значение. Пространственное распределение концентрации примеси так же претерпевает изменения, заключающиеся в изменении спектрального состава крупномасштабной турбулентности – смещение минимума корреляции от значений порядка 1,5 км и 5 км при холодной погоде к масштабам 3-4 км при теплой.

4. Анализ пространственных структурных функций концентрации химических примесей и индекса рефракции показал устойчивое увеличение амплитуды флуктуаций с ростом дистанции. Аппроксимация структурных функций степенной зависимостью показала согласование показателя степени с теоре-

тической гипотезой и позволила определить основные закономерности макротурбулентных неоднородностей. Наблюдается уменьшение показателя степени с ростом масштабов неоднородностей. Наиболее достоверно описанное поведение демонстрируют структурные функции температуры, концентраций водяного пара и аэрозоля.

5. Определены основные закономерности временной изменчивости концентраций примесей в городском воздухе. Обнаружены значительные сезонные вариации, показавшие, что концентрации большинства примесей имеют более высокие значения в зимний период. Суточные вариации концентраций NO , NO_2 , CO имеют значимый минимум в интервале с 11 до 16 часов. Показано, что основными факторами, определяющими суточные вариации уровня загрязнения воздуха, являются скорость ветра и влажность воздуха. Получены численные оценки концентраций примесей и их изменчивости в течение суток для каждого месяца. Эти результаты важны для использования при расчете пространственного распределения примесей, и могут использоваться в моделях динамики примеси в атмосфере.

6. Предложен метод учета и сделаны оценки величины влияния химических примесей на индекс рефракции среды, показавшие, что коэффициент преломления при обычных условиях на 82% определяется неполярными газами атмосферы, на 17% водяным паром, а вклад всех химических примесей составляет величину порядка 0,006%. Предложенный метод был опробован для расчета параметров рассеянного на неоднородностях сигнала, оптической толщины неоднородной атмосферы с примесями. Проведены модельные расчеты пространственной изменчивости оптической толщины по радиотрассе, показавшие, что химические примеси оказывают малое влияние при обычных условиях.

Полученные результаты имеют значительную практическую ценность, ввиду высокой статистической надежности, поскольку в их основу положены данные многолетнего, непрерывного мониторинга реального состояния атмосферного воздуха. Это позволило выявить статистически значимые закономерности.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Jouravlev A.A., Andrianov N.S., Khutorova O.G. (1999) Refraction of radio waves in the troposphere with pollution. J Environ. Radioecol. Appl. Ecol. V.5. N.1. pp. 11-17.

2. Журавлев А.А., Хуторова О.Г. (1999) Распространение радиоволн в турбулентной атмосфере с химическими загрязнениями, тез. докладов XIX Всерос. науч. конф. По распространению радиоволн, Казань, С. 309-310.
3. Jouravlev A.A., Teptin G.M., Khutorova O.G., Korchagin G.E. (2000) Spatial structure of mesoscale variations of tropospheric aerosol. Proc. Intern. Aerosol Conf., Moscow, Russia, pp. 167-171.
4. Журавлев А.А., Тептин Г.М., Хуторова О.Г. (2000) Эмпирическая модель мезомасштабных неоднородностей в нижней тропосфере, тез. докладов VII рабочей группы Аэрозоли Сибири, Томск, С. 68
5. Jouravlev A.A., Teptin G.M., Khutorova O.G. (2000) Experimental investigation of mesoscale inhomogeneities of atmospheric aerosols and impurities. J Environ. Radioccol. Appl. Ecol., V.6, N.3, pp. 24-27.
6. Журавлев А.А., Хуторова О.Г. (2001) Рефракция электромагнитных волн в реальной турбулентной атмосфере с загрязнениями, Оптика атмосферы и океана, Т.14, N.2, С. 137-141.
7. Jouravlev A.A., Teptin G.M., Khutorova O.G. (2001) Temporal variations of spatial structure in tropospheric aerosols inhomogeneities. J Aerosol Sci., V.32, S.1, pp. 155-156.
8. Журавлев А.А., Тептин Г.М., Хуторова О.Г. (2001) Пространственная структура мезомасштабных неоднородностей концентрации примеси в нижней тропосфере, Оптика атмосферы и океана, , Т.14, , N.6-7, С. 543-546.
9. Jouravlev A.A., Teptin G.M., Khutorova O.G. (2001) Effect of Meteorological Conditions on Urban Aerosol Concentration. Proc. of 2nd Asian Aerosol Conference, pp.275-276.
10. Jouravlev A.A., Teptin G.M., Khutorova O.G. (2001) Empirical structure of mesoscale turbulence at different meteorological conditions. Abstracts American Association for Aerosol Research Conf., Portland, USA, p. 139.
11. Журавлев А.А., Тептин Г.М., Хуторова О.Г. (2001) Влияние метеорологических параметров на массовую концентрацию аэрозоля, тез. докладов VIII рабочая группа Аэрозоли Сибири, Томск, С. 41.
12. Журавлев А.А., Тептин Г.М., Хуторова О.Г. (2002) Исследование антропогенной составляющей суточной изменчивости концентрации газовых составляющих и аэрозоля в городском воздухе. Оптика атмосферы и океана, Т.15, N.10. С. 929-934.

13. Jouravlev A.A., Teptin G.M. (2002) Temporal and spatial fluctuations of refractive index in polluted air and electromagnetic waves propagation. Abstracts of IX Joint International Symposium at Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics., Tomsk, Russia, p. 78.

14. Журавлев А.А., Тептин Г.М. (2002) Вариации коэффициента преломления радиоволн в нижней тропосфере с загрязняющими примесями с учетом изменчивости метеоусловий. Труды XX Всероссийской конференции по распространению радиоволн, Нижний Новгород, Россия. С. 181.

15. Журавлев А.А., Тептин Г.М. (2002) Турбулентные флуктуации коэффициента преломления воздуха с учетом примесей, влияние на распространение радиоволн. Труды XX Всероссийской конференции по распространению радиоволн, Нижний Новгород, Россия. С. 179-180.

16. Журавлев А.А., Тептин Г.М., Хуторова О.Г. (2002) Рефракционные явления в реальной турбулентной атмосфере с примесями. Труды XX Всероссийской конференции по распространению радиоволн, Нижний Новгород, Россия. С. 222-223.

17. Журавлев А.А., Тептин Г.М., Хуторова О.Г. (2002) Учет турбулентных явлений в модели рефракции в среднеширотной ионосфере. Труды XX Всероссийской конференции по распространению радиоволн, Нижний Новгород, Россия. С. 476-477.

18. Jouravlev A.A., Teptin G.M. Space distribution of aerosol concentration and chemical impurities in lower atmosphere, J. Sixth international aerosol conference, Abstracts, September 9 - 13, 2002, Taipei, Taiwan, 2002, p. 809.

19. Jouravlev A.A., Khoutorova O.G., Teptin G.M. Temporal and spatial fluctuations of refractive index in polluted air and electromagnetic waves propagation, J. Sixth international aerosol conference, Abstracts, September 9 - 13, 2002, Taipei, Taiwan, 2002, pp. 323-324.

Используемая литература:

1* Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967 г. 548 с.

2* Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. Изд. 2-е. М.: Советское радио, 1972 г. 464 с.

3* Горчаков Г.И., Шишков П.О., Копейкин В.М., Емиленко А.С., Исаков А.А., Захарова П.В., Сидоров В.Н., Шукуров К.А. Лидарно-нефелометрическое зондирование аридного аэрозоля. Оптика атмосферы и океана. Т.11. N.10, 1998. С.1118-1123.

4* Аганбекян К.А., Ермаков Е.Б., Куликов В.В., Плохотнюк Е.Ф. Влияние газов промышленного происхождения на распространение миллиметровых радиоволн. // Тез. докл. XV всесоюз. конф. по распространению радиоволн, М.: Наука, 1987. С. 338.